

고속용 판토티래프의 개념설계

Concept Design of the Pantograph for High Speed Trains

한형석* 경진호* 송달호* 배정찬**

Han, Hyung-Suk Kyung, Jin-Ho Song, Dahl-Ho Bae, Jung-Chan

ABSTRACT

Conceptual design of the pantograph for high speed trains of 350km/h is introduced. The aims to be accomplished in the concept design are the good dynamic performance, low noise, aero-dynamic stability. The resulting mechanism of the pantograph have single-arm type structure with bebel gears to reduce noise sources, symmetric structure for the aero-dynamic stability and the special panhead assembly to obtain good dynamic performances.

1. 서론

판토티래프는 전차선(catenary)으로부터의 전류를 차량에 전달하는 장치로서 전동차 지붕 위에 설치되어 있다. 판토티래프의 설계 목표는 고속 및 다양한 환경 조건하에서 연속적이고 일정한 량의 전류를 차량에 전달하도록 하는 것이다. 열차가 고속화될수록 전류의 흐름이 중단되는 이선, 접촉선과 판토티래프 집전판의 마모, 공력 소음 등이 큰 문제로 대두되고 있다. 유럽과 일본에서는 이러한 문제를 인식하고 고속용 판토티래프에 대한 연구·개발을 활발히 진행하고 있다.

우리 나라에서는 고유한 고속용 판토티래프가 없지만 현재 G7사업으로 개발을 수행하고 있다. G7사업에서의 최고 차량속도는 350km/h으로 현재 건설중인 경부선보다 50km/h가 향상된 속도이다. 경부선에 이용될 판토티래프를 350km/h에 이용할 때 속도향상에 의한 성능저하가 예상되며 연구결과에서도 이것을 나타내고 있다[1]. 그러므로 350km/h에 적합한 한국형 판토티래프의 개발이 요구되며 개발완료시 국산화를 이룩할 뿐만이 아니라 기존선 및 저속선에 응용이 가능하다.

본 논문에서는 G7 사업으로 수행중인 "판토티래프 개발"과제의 연구결과로 한국형 고속용 판토티래프의 구조적 개념설계에 대하여 소개한다. 한국형 판토티래프의 설계목표는 350km/h에서 1% 이하의 이선 확보, 저소음형, 공기력학적 안정성 및 경제성의 달성에 두고 있다. 이를 위하여 싱글암형 구조에 기초하고 독창적인 링크 구조, 팬헤드부 구조를 가지는 고유 형상의 판토티래프에 대한 개념설계를 실시하였다.

* 한국기계연구원, 정회원

** 한국생산기술연구원

2. 설계 기술

2.1 기구적 설계

기구적 설계는 구조설계에 있어서 가장 기초적인 설계 단계로서 주어진 차량과 가선계에 대한 Gauge와 운영조건을 만족하도록 기구적 구조와 치수를 결정하는 것이다. 즉 각 부재의 길이 및 연결부를 결정하는 것이다. 현재 전세계적으로 가장 많이 이용되는 판토프레프의 기본 구조는 크로스암 또는 다이아몬드형이라 불리는 비대칭형과 싱글암형이라 불리는 비대칭형이다[2]. 비대칭형 즉 싱글암형 구조의 이점은 상대적으로 경량 구조면서도 큰 기계적 강성을 갖고 접히는 공간은 적으나 넓은 범위의 가선계 높이에 이용 가능하다는 것이다[2]. 때문에 싱글암형은 고속용에 적합한 것으로 알려져 있다. 비대칭형 판토프레프의 설계 원리는 그림 1에서와 같이 팬헤드부가 운영높이에서 Y 축방향, X축 방향 그리고 기울기가 정해진 설계공차내에 있도록 각 링크의 길이와 연결점의 위치를 결정하는 것이다.

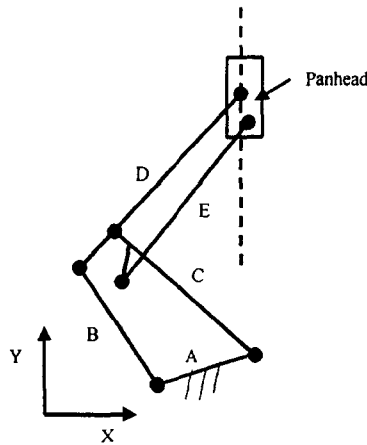


그림.1 비대칭형(싱글암)의 기구적 설계

2.2 동력학적 설계

판토프레프와 가선사이의 이선 발생 원인에는 많은 요인이 있으나 주 원인은 가선의 정적 강성도의 불균일이다. 가선계의 강성도 불균일은 가선계의 구조에 따라 결정되며 주로 장력, 행거의 길이, 스패 길이가 큰 영향을 준다. 강성도의 불균일성이 최소화될수록 판토프레프에 작용하는 가진원의 진폭이 작아져 이선의 발생이 작아지게 된다. 가선의 강성도가 불균일하기 때문에 판토프레프가 접촉하여 주행할 때 가선은 크게 두 주파수 즉 스패주파수(span frequency), 행거주파수(hanger frequency)로 판토프레프를 가진하게 된다. 그러므로 판토프레프와 가선사의 이선을 최소화 하기 위해서는 판토프레프의 추종성이 스패주파수와 행거주파수에서 극대화되도록 설계해야 하는 것이다. 일반적으로 동적강성(dynamic stiffness)이 추종성의 척도로 이용되며 상기의 두 주파수에서 동적강성이 최소가 되도록 질량, 스프링의 강성, 감쇠기의 감쇠계수를 설계하는 것이 동적설계의 핵심이다. 스패주파수 f_s 와 행거주파수 f_d 는 V/l_s , V/l_d 으로 각각 계산할 수 있

다. V 는 차량의 속도, l_s 는 스패ん길이, l_d 는 행거 간격이다. TGV-K의 경우 $V=300 \text{ km/h}$, $l_s = 63\text{m}$, $l_d = 6.75\text{m}$ 이므로 $f_s = 1.32\text{Hz}$, $f_d = 12.3 \text{ Hz}$ 임을 알 수 있다. 그림 2는 TGV-K의 GPU 판토히레프에 대한 동적강성을 3자유도 모델을 이용하여 구한 것을 보여주고 있다[1]. 그림 2에서 얽은 수직선으로 표시된 주파수는 차량의 속도가 300km/h 일 때의 스패ん주파수, 행거주파수이다. 동적강성이 작을 수록 그 주파수에서 추종성이 좋다. 현재 설계치는 최소치 근처에 위치하는 것을 볼 수 있으며 차량의 실제 운행속도의 대부분이 300km/h 이하인 것을 고려하면 합리적으로 설계된 것을 알 수 있다. 차세대 한국형 차량의 속도는 350km이므로 현 GPU를 그대로 이용하면서 속도를 증가시켰을 때의 주파수는 그림 2에서 진한 수직선이다. 주파수 값이 속도에 따라 증가하고 동적강성의 크기도 상대적으로 증가함으로 성능저하를 예상할 수 있다. 그러므로 300km/h 용 판토히레프를 350km/h에 적용하기 위하여는 수정이 필요함을 알 수 있다.

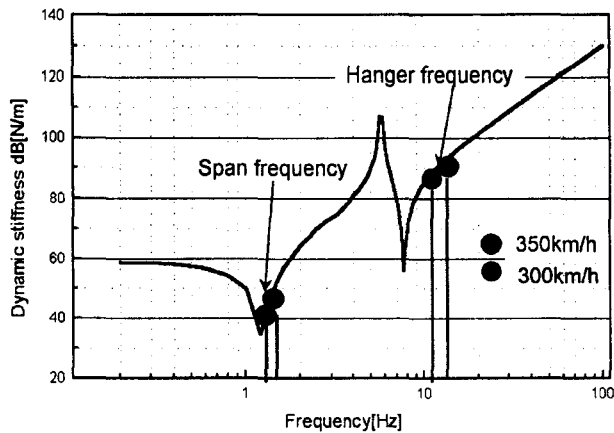


그림. 2 TGV-K(GPU)의 동적 특성

2.3 강도 설계

강도 설계는 판토히레프의 안전을 확보하도록 재료 및 치수를 설계하는 것이다. 국제규정 UIC 608이 이용될 수 있으며 UIC 608에서는 팬헤드에 횡방향으로 300N의 하중이 가해질 때 30mm 이하의 변형을 만족하도록 규정하고 있다. 또한 가선과의 상호작용에 의한 동적하중을 고려하여 설계해야 한다.

2.4 공력학적 설계

공력학적 설계에서 다루는 것은 공력에 의한 소음과 양력 즉 판토히레프 상승력이다. 소음은 최소화되어야 하고 양력은 주행방향, 운영 높이에 따라 차이가 최소화되도록 하는 것이 설계방향이다. 소음은 유동장내 물체의 뒤면에서 Karman vortex가 반복적으로 생성, 소멸함에 따른 압력 변동이나 물체의 표면으로부터 경계층이 분리될 때 생성되는데 전자의 영향이 크다. 두 소음원 모두 물체의 형상과 표면의 특성에 종속적이다. 그러므로 운행속도에서 이러한 소음 발생이 작도록

경계층이 분리되는 것을 방지하기 위하여 유선형으로 만드는 것과 표면을 거칠게 하여 난류가 형성되도록 하는 방법이 이용된다. 양력은 압력의 차이에 의해 상승 또는 하강하는 힘이다. 소음과는 달리 양력의 변화는 유선형에 가까울수록 각도 변화에 따라 크게 변한다. 양력은 너무 크면 접촉력을 크게함으로 마모 및 이선의 증대를 야기한다. 반면에 양력이 너무 작으면 판토프를 하강 시킴으로 이선이 커지게 된다. 특히 터널 통과시 속도 증가에 따른 양력 변화를 설계에 고려해야 한다. 기존의 판토프에서는 집전판 및 집전판부의 형상 설계에 있어서 양력변화를 고려하여 4각형 구조를 많이 이용하고 있다. 4각형 구조의 장점은 대칭형 형상이기 때문에 방향에 따른 양력 변화가 작은 특징을 갖는다. 그러나 소음에는 단점을 가진다. 최근 일본에서는 소위 익형이라 하여 유선형의 형상을 최적화 하여 소음과 양력 측면에서 모두 장점을 가지는 판토프를 개발하고 있다[3].

3. 개념설계

한국형 고속용 판토프의 개념설계를 성능 시방과 사용환경을 고려하여 네가지 방향을 실시하였다. 개념설계 결과는 그림 3, 그림 4, 그림 5, 그림 6에서 보여주고 있다.

부품의 최소화

부품의 최소화로 경제성을 확보하고자 하였다. 이를 위하여 상하운동 기구를 싱글암형을 택하였다. 싱글암은 상기와 같이 단순한 구조이면서도 좋은 기계적 강성을 가지는 장점을 가지기 때문이다. 또한 제어기구에 공기벨로우즈(air-bellows)를 채택하였다. GPU 판토프의 경우 제어기구에는 2개의 주스프링, 공기 실린더, 실린더 내부 스프링으로 구성된다. 그러나 독일 DSA 350S의 경우 공기벨로우즈 하나로 같은 기능을 가진다. 공기벨로우즈는 압력을 일정하게 유지하는 기능을 가진으로 정적 압상력을 유지할 수 있는 장치이다.

공력소음 최소화

공력소음을 줄이기 위하여 싱글암구조를 택하였다. 싱글암은 다이아몬드 또는 크로스 아암에 비하여 부재의 수가 적고 두껍기 때문에 소음에 유리하기 때문이다. 또한 본 과제의 독창적 설계로 2개의 링크를 상하 두 개 프레임에 내재시킴으로써 노출되는 부재를 줄였다. 그러면서도 기구적 운동을 만족하게 하기 위하여 하부 로드는 베벨기어를 이용하였다. 즉 베벨기어를 이용하여 하부프레임의 회전에 대하여 동일한 회전운동을 상부프레임에도 일어나도록 하는 것이다. 결과적으로 싱글암의 구조이면서 결과적인 운동은 대칭형과 동일하다는 장점을 갖는다.

양력 최적화

양력의 방향에 따른 변화를 줄이기 위하여 상·하프레임의 길이를 동일하게 함으로써 대칭성을 확보하였다. 즉 다이아몬드형의 1/2 형태와 유사하다고 할 수 있다. 또한 팬헤드부의 형상을 기존의 것과 같은 4각형 구조를 택함으로써 양력변화를 줄이도록 하였다. 한국의 노선은 터널이 많기 때문에 양력의 안정이 중요하게 고려되어야 한다.

동적 추종성 극대화

동적 추종성을 극대화하기 위하여 그림 6에서와 같이 GPU 형과 유사한 2-단 현가 구조를 갖는다. 즉 2개의 현가를 가지게 함으로써 스펀주파수와 행거주파수에 대한 추종성을 좋게하는 것이다. 또한 팬헤드부에 있어서 주폴런저와 크로스바의 연결부에 회전조인트를 추가하여 팬헤드부의 pitch 각을 약간 갖도록 하였다. 집전판부의 질량을 감소시키는 구조를 취하기 위하여 보우혼을

크로스바에 설치하지 않고 주플런저 스프링 상 질량에 배치시켰다.

각 부품에 대한 구조와 기능은 다음과 같다.

(1) 기초 프레임(base frame)

기초프레임은 판토크래프의 기초대로써 절연애자위에 설치되며 하부프레임, 감쇠기, 공기벨로우즈 등이 기초프레임에 연결된다. 특히 본 구조의 특징인 베벨기어가 중앙에 설치되어 있다. 이 베벨기어는 하부로드와 연결되어 하부프레임의 회전운동을 전달하여 상부프레임도 같은 운동을 하게 한다.

(2) 절연 애자(insulator)

절연애자는 차량의 지붕과 판토크래프 사이의 절연을 위하여 설치된다.

(3) 하부 프레임(lower frame)

하부프레임은 기초프레임에 회전조인트로 연결되어 회전운동을 함으로써 기구의 상하운동이 가능하게 한다. 하부프레임은 원형 파이프 구조이며 내부에 하부로드를 내재하고 있는 것이 특징이다.

(4) 하부 로드(lower rod)

상하운동을 위하여 설치되며 하부 프레임의 내부에 설치된다. 또한 양 끝단에 베벨기어가 설치되어 기초프레임의 기어, 힌지 기어와 연결된다.

(5) 힌지

하부프레임과 상부프레임을 연결하여 상대적 회전운동을 가능하게 한다. 그러나 그 이외에도 추가 기능을 가진다. 다른 판토크래프와는 다르게 힌지부의 한쪽은 상부프레임에 고정된다. 상부프레임의 회전운동을 가능하게 하기 위함이다. 또한 중앙에 베벨기어가 있어 하부 로드와 베벨기어으로써 연결된다. 또한 하부프레임과 상부 로드를 연결시키는 부재가 내재된다.

(6) 상부 프레임(upper frame)

상부프레임은 힌지와 주플런저에 연결된다. 원형구조를 가지며 상부 로드를 내재한다.

(7) 상부 로드

상부 로드는 하부프레임과 주플런저를 연결하여 주플런저가 수직위치를 유지하도록 하는 부재이다.

(8) 팬헤드 어셈블리

팬헤드 어셈블리는 그림 6에서 보는 것 같이 주플런저, 플러저 스프링, 크로스 바, 보우, 보우혼, 보우 스프링, 접촉판으로 구성된다.

(가) 주플런저 및 스프링

주플런저와 스프링은 스펀주파수에 대한 추종성을 위하여 설치된다. 그리고 주플런저는 상부 프레임, 상부 로드와 연결된다.

(나) 크로스 바

주플런저에 끼워져 상하운동을 수행하며 스프링 위에 있으므로 스프링력을 전달한다. 또한 크로스 바와 연결된다. 여기서 중간에 회전조인트가 있어서 보우가 약간 회전하게 하여 접촉선의 형상불균일에 대한 추종성을 좋게 한다. 그러나 이 경우 양력에 부정적이 요인으로 작용할 수 있다. 크로스 바 양 끝단에는 보우 스프링이 설치된다. 이 스프링은 고주파수인 행거 주파수에 대한 추종성을 좋게 하기 위하여 설치한다. 크로스 바에는 보우혼이 설치되어 접촉선의 끼어듦을

방지하게 된다. 보우혼의 형상은 국제 규격을 따라 설계할 수 있다.

(다) 보우

보우는 집전판이 설치된 부재로 접촉판을 지지하며 4각형 구조로 설계하였다. 이는 양력 특성에는 장점을 가지기 때문이다.

(라) 접촉판

접촉판은 접촉선과 직접 접촉하여 전류를 전달시키는 역할을 한다. 접촉판의 두께 및 크기는 전류의 용량과 관계가 있고 재료는 마모와 통전성을 고려하여 결정한다.

(9) 공기 벨로우즈

공기벨로우즈는 판토히스트의 상·하운동에 필요한 토그 발생 및 정적 압상력 유지에 이용된다.

(10) 감쇠기

판토히스트의 하강시 충격 완화를 위해 설치된다.

4. 결론

상기와 같이 한국형 고속용 판토히스트에 대한 구조적 개념설계를 실시하였다. 본 개념설계는 유럽제품, 일본 제품의 장점과 고유한 독창적인 아이디어를 적용하여 한국의 운행조건에 적합하도록 설계하였다. 특히 싱글암구조이면서도 운동은 대칭형과 같다는 장점을 가진다. 결과적으로 동적추종성, 공기력학적, 경제성 면에서 우위를 가질 것으로 기대한다. 차후 기본 및 상세설계에서는 구체적인 설계치가 도출되어야 하며 설계변경이 있을 수 있을 것으로 사료된다.

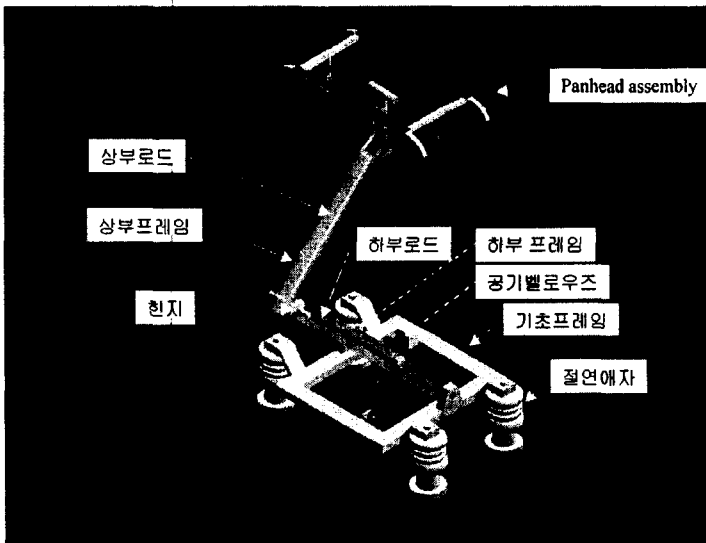


그림. 3 개념설계 판토히스트의 Iso view

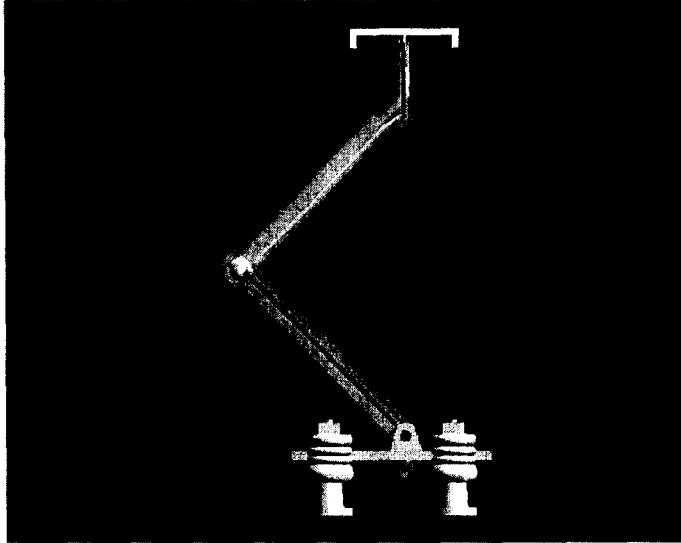


그림. 4 개념설계 판토티그래프의 Side view

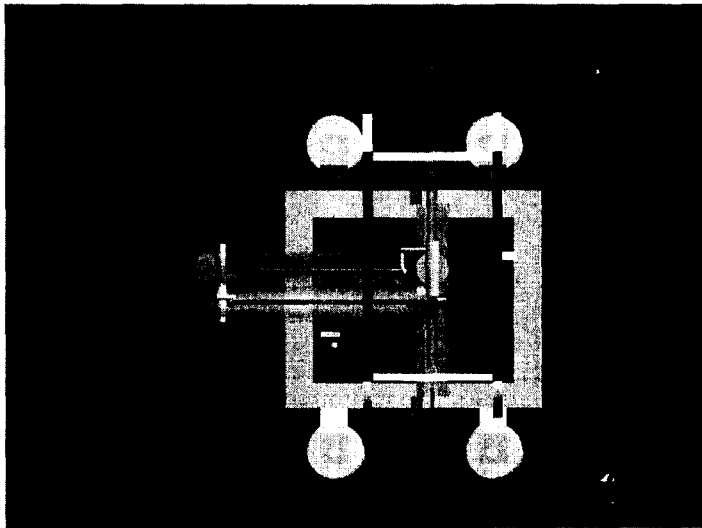


그림. 5 개념설계 판토티그래프의 Top view

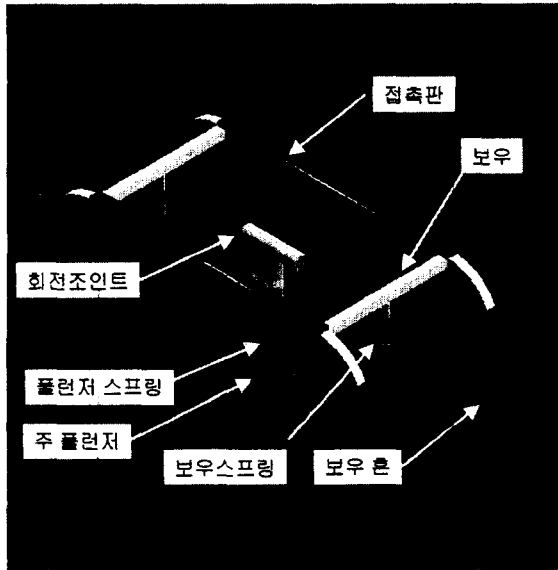


그림. 6 팬헤드 조립부

참고문헌

1. 경진호, 허신, 최진민, 송달호, 한형석(1997), "350km/h급 고속전철용 가선-판토히레프 시스템의 이선 저감에 관한 연구", 대한기계학회 춘계 학술강연 및 논문발표회 강연·논문집(충청지부), pp.156-161.
2. 한형석, 경진호, 송달호(1998), 기계와재료, Vol. 10, No.3, pp.113-119.
3. Katsushi Manabe, Mitsur Lkeda(1994), "Development of low-noise pantograph," Proceeding of WCRR.